Fenomenología y simetrías de cuerdas

Anamaría Font V.

Facultad de Ciencias, Universidad Central de Venezuela

`mattermost.redclara.net@afont`

Contenido

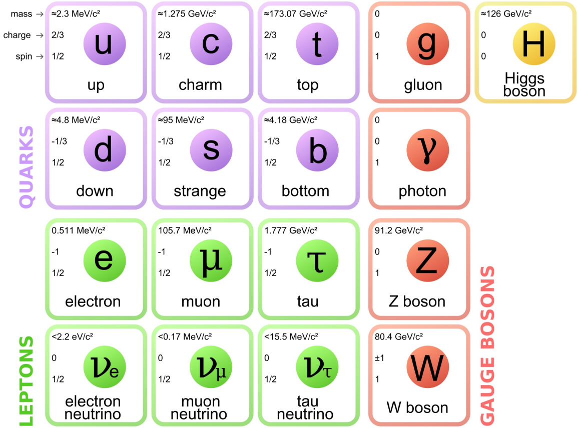
- Motivación
- Cuerdas
  - Introducción
  - Simetrías
  - Fenomenología
- Resumen y Perspectivas

∗ presentación parcializada hacia temas
en los que he trabajado

∗ disculpas por no incluir referencias

Motivación

El Modelo Estándar



Modelo Estándar – campos

Interacciones fuertes y electrodébiles = teoría cuántica de campos de calibre

$$\underbrace{SU(3)}_{\text{gluones } g^a_\mu} \times \underbrace{SU(2) \times U(1)_Y}_{W^\pm_\mu,\ Z_\mu,\ A_\mu}$$

vectores de calibre
(portadores de fuerzas) $\longrightarrow$

$W^\pm$, Z masivos por ruptura espontánea de simetría

	campo/partícula	$SU(3)$	$SU(2)$	$U(1)_Y$
quarks 1ra gen	$\begin{pmatrix} u_L \\ d_L \end{pmatrix}$	**3**	**2**	$\frac{1}{6}$
	u_R	**3**	**1**	$\frac{2}{3}$
	d_R	**3**	**1**	$-\frac{1}{3}$
leptones 1ra gen	$\begin{pmatrix} \nu_{e_L} \\ e_L \end{pmatrix}$	**1**	**2**	$-\frac{1}{2}$
	e_R	**1**	**1**	-1
Higgs	$\begin{pmatrix} \varphi^+ \\ \varphi^0 \end{pmatrix}$	**1**	**2**	$\frac{1}{2}$

Y : hipercarga

el patrón de la 1ra generación se repite en la 2da y la 3ra

Modelo Estándar – Lagrangiano

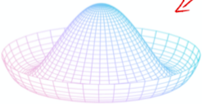
$SU(3)$ $\qquad$ $SU(2)$ $\qquad$ $U(1)_Y$

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4}\sum_{a=1}^{8} G^{a}_{\mu\nu} G^{\mu\nu}_{a} - \frac{1}{4}\sum_{k=1}^{3} W^{k}_{\mu\nu} W^{\mu\nu}_{k} - \frac{1}{4} B_{\mu\nu} B^{\mu\nu}$$

$$+ \underbrace{\sum_{i=\{\text{quarks},\,\text{leptones}\}} \overline{\Psi}_i\, i\gamma^\mu D_\mu \Psi_i}_{\mathcal{L}_{Dirac}} - \underbrace{\sum_{i,j} \left(Y_{ij}\, \overline{\Psi}_i H \Psi_j + \text{c.h.} \right)}_{\mathcal{L}_{Yukawa}}$$

$$+ \underbrace{D_\mu H^\dagger D^\mu H - V(H)}_{\mathcal{L}_{Higgs}}$$

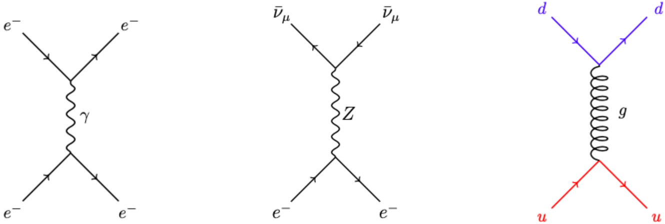
potencial del "sombrero"



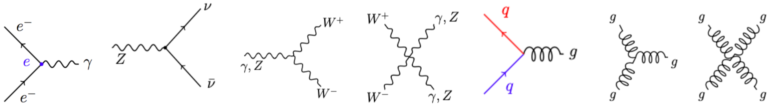
$\Rightarrow$ ruptura espontánea de simetría

$\langle H \rangle \neq 0$

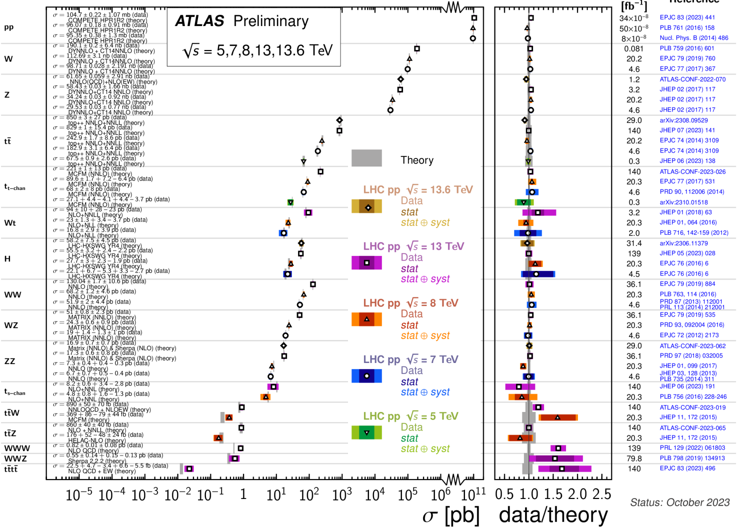
Modelo Estándar – Interacciones



diagramas de Feynman construidos con vértices fundamentales, e.g.



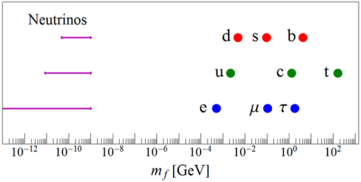
Standard Model Total Production Cross Section Measurements



Status: October 2023

Modelo Estándar – Problemas abiertos

- 19 parámetros libres, e.g. 3 constantes de acoplo, masas de quarks y leptones.
- Problema del sabor y masas de neutrinos.



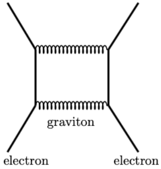
- Explicación de la materia oscura.
- Explicación de la asimetría entre materia y anti-materia
- ¿ Por qué $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ y materia en ciertas representaciones ?
- ¿ Por qué la masa del Higgs no se modifica por correcciones radiativas ?
- ¿ Gravedad ?

Gravedad

- ▷ teoría clásica: relatividad general
- ▷ magnitud proporcional a masa = energía $\Rightarrow$ gran magnitud a altas energías
- ▷ comparable a interacciones fuertes y electrodébiles a la escala de Planck

$$L_{\mathrm{P}} = \sqrt{\frac{G_N \hbar}{c^3}} = 1.6 \times 10^{-35}\,\mathrm{m}, \quad E_{\mathrm{P}} = \sqrt{\frac{\hbar c^5}{G_N}} = 1.2 \times 10^{19}\,\mathrm{GeV}, \quad E_{\mathrm{LHC}} = 10^4\,\mathrm{GeV}$$

Energías y distancias a la escala Planck ocuren e.g. durante el big bang

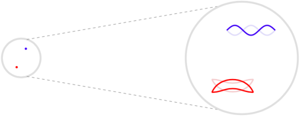
- ▷ correcciones cuánticas tales como  son infinitas

- ▷ se necesitan nuevas ideas para una teoría cuántica de gravedad $\Longrightarrow$ cuerdas ?!

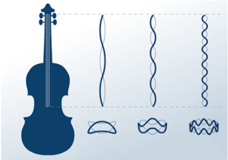
Cuerdas

Cartilla de Cuerdas

- ▷ en vez de puntos, las partículas se describen por cuerdas vibrantes, abiertas o cerradas

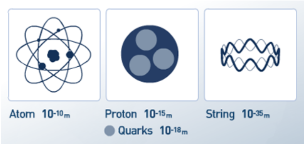


- ▷ todas las partículas elementales son modos de vibración



- ▷ los modos de vibración de cuerdas cerradas siempre incluyen al gravitón
  masa nula, espín 2, campo = métrica G_{MN}, tensor de 2 índices sin traza

- ▷ escala
  $L_{\mathrm{cuerda}} \sim L_{\mathrm{P}} \sim 10^{-35}\mathrm{m}$



▷ interacciones = unión/separación de cuerdas

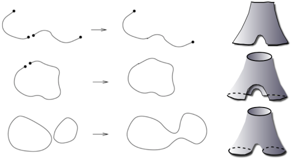
∗ cuerdas abiertas y cerradas

cuerdas tipo I

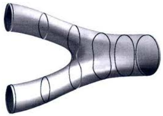
∗ sólo cuerdas cerradas

cuerdas tipo IIA y IIB

cuerdas heteróticas $E_8 \times E_8$ y $SO(32)$

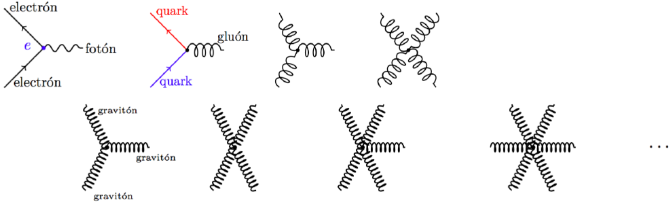


▷ unificación



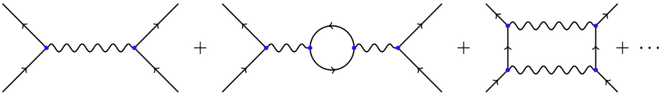
vértice fundamental

incluye todas las interacciones

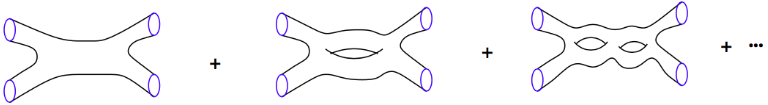


▷ expansión perturbativa

∗ teoría cuántica de campos, e.g. QED



∗ cuerdas



todas las correcciones cuánticas son finitas

cuerdas $\Longrightarrow$ teoría cuántica finita de gravedad y otras interacciones fundamentales

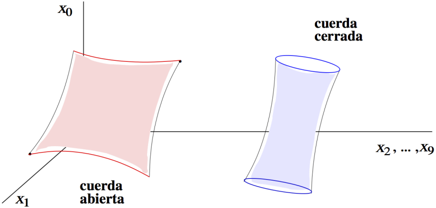
▷ supersimetría, necesaria para eliminar taquión y obtener fermiones en el espectro

▷ dimensiones extra

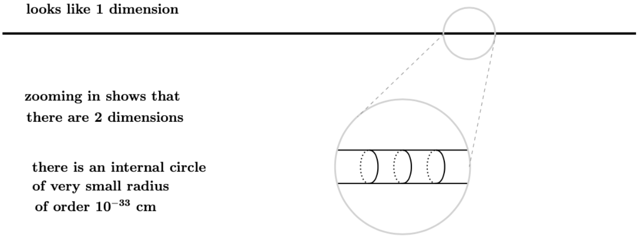
invariancia de Lorenz

$\Downarrow$

$(1+9)$ dimensiones

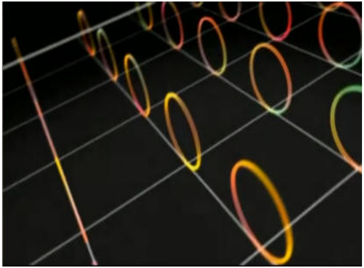


compatible con observaciones si las dimensiones extra son compactas y pequeñas, por ejemplo



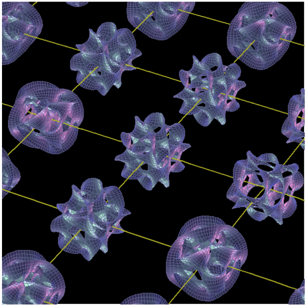
idea Kaluza-Klein

en forma similar, las 6 dimensiones espaciales adicionales forman un espacio interno compacto de tamaño típico $L_{\text{cuerda}} \sim 10^{-33}$cm



espacio interno: toroide $T^6 = (S^1)^6$

radio $\sim$ L_{cuerda}



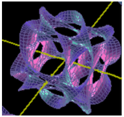
espacio interno: variedad Calabi-Yau

$\sqrt[6]{\text{vol}} \sim L_{\text{cuerda}}$

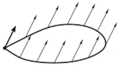
Compactificación y variedades Calabi-Yau (CY)

espacio compacto en $6d$

espacio-tiempo en $10d$ $\rightarrow$ (espacio-tiempo en $4d$) $\times$ Y



solución de ecs. de mov. $\langle G_{MN} \rangle = \begin{pmatrix} \eta_{\mu\nu} & 0 \\ 0 & G_{mn} \end{pmatrix}$



supersimetría en $4d$ $\Rightarrow$ Y variedad CY

Y admite espinor covariantemente constante

Y admite coordenadas complejas, métrica Kähler

$y^m \rightarrow z^a, \bar{z}^{\bar{a}} \quad G_{a\bar{c}} = \partial_a \bar{\partial}_{\bar{c}} K$

$\exists$ muchas variedades CY, caracterizadas por números de Hodge $h^{1,1}, h^{1,2}$

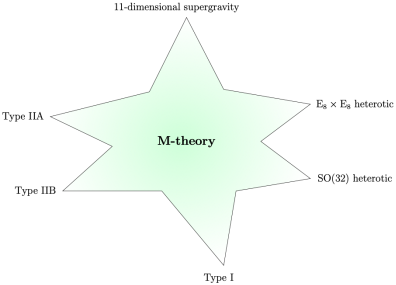
$h^{1,1} = \#$ formas armónicas $\omega_{b\bar{a}} = \#$ móduli Kähler (tamaño)

$h^{1,2} = \#$ formas armónicas $\omega_{b\bar{a}\bar{c}} = \#$ móduli estructura compleja (forma)

e.g. quíntica en $\mathbb{CP}^4$: $X_1^5 + X_2^5 + X_3^5 + X_4^5 + X_5^5 + c_1 X_1^2 X_2^2 X_3 + c_2 X_3^2 X_4^2 X_5 + \cdots = 0$

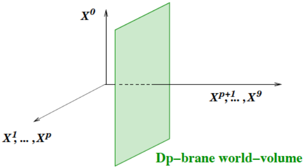
$h^{1,1} = 1,\ h^{1,2} = 101$

- 5 teorías consistentes en (9+1) dimensiones: Heterótica $\mathrm{E}_8 \times \mathrm{E}_8$, Heterótica $\mathrm{SO}(32)$, Tipo I $\mathrm{SO}(32)$, Tipo IIB, Tipo IIA
  todas con supersimetría
- las teorías están relacionadas por
  simetrías de dualidad
- las 5 teorías, más una en 11 dimensiones, son puntos especiales en el espacio de parámetros de una estructura única llamada **teoría M**



Teoría	dim	# susy	espectro bosónico
Heterótica $\mathrm{E}_8 \times \mathrm{E}_8$	10	16	$G_{MN}, B_{MN}, \varphi, A^a_M$
Heterótica $\mathrm{SO}(32)$	10	16	$G_{MN}, B_{MN}, \varphi, A^a_M$
Tipo I $\mathrm{SO}(32)$	10	16	NS-NS: G_{MN}, φ R-R: C_{MN}, D_9: A^a_M
Tipo IIB	10	32	NS-NS: G_{MN}, B_{MN}, φ R-R: C, C_{MN}, C_{MNPQ}
Tipo IIA	10	32	NS-NS: G_{MN}, B_{MN}, φ R-R: C_M, C_{MNP}
Supergravedad 11d	11	32	G_{MN}, C_{MNP}

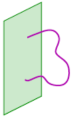
▷ las teorías tipo II tienen campos R-R que se acoplan a Dp-branas: objetos extendidos en p dimensiones espaciales



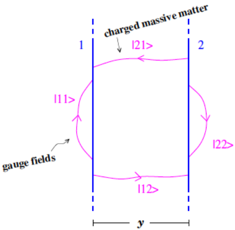
▷ los grados de libertad de Dp-branas corresponden a cuerdas abiertas con extremos sobre las branas

estados masa nula: multiplete Yang-Mills U(1)

incluye escalares $\sim$ direcciones transversas



▷ pila de N Dp-branas $\Rightarrow$ grupo gauge U(N)

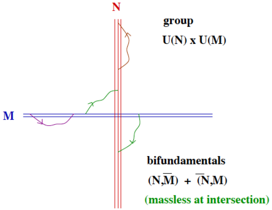


$$U(1) \times U(1) \xrightarrow{y=0} U(2)$$

Higgs mechanism = brane separation

$\Phi \sim y$ (transverse d.o.f.)

$\langle \Phi \rangle \neq 0 \iff y \neq 0$

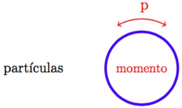


Simetrías de Cuerdas

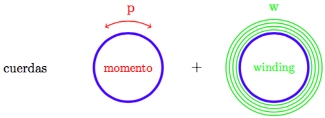
T-dualidad

las cuerdas detectan la geometría en forma diferente

e.g. partículas *vs* cuerdas en círculo de radio R



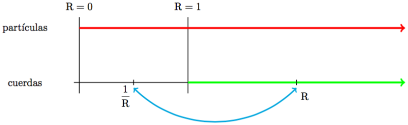
$$e^{ipx} = e^{ip(x+2\pi R)} \;\Rightarrow\; p = \frac{n}{R}, \quad n \in \mathbb{Z}$$

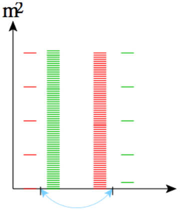


espectro

$$m^2 = \left(\frac{n}{R}\right)^2 + (wR)^2, \qquad n, w \in \mathbb{Z}$$

simetría : $\quad n \longleftrightarrow w, \qquad R \longleftrightarrow \dfrac{1}{R}$





▷ Heterótica $E_8 \times E_8 \overset{T}{\longleftrightarrow}$ Heterótica $SO(32)$

Tipo IIA $\overset{T}{\longleftrightarrow}$ Tipo IIB

S-dualidad

$$\begin{array}{ccc} \text{teoría de cuerdas} & \xleftrightarrow{S} & \text{teoría de cuerdas} \\ \text{con acoplo } g \text{ pequeño} & & \text{con acoplo } g' \text{ grande} \end{array}$$

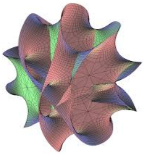
$$\text{acoplo } g \ll 1 \quad \xleftrightarrow{S} \quad \text{acoplo } g' = 1/g \gg 1$$

- Similar a T-dualidad $R \leftrightarrow 1/R$
- $g = \langle e^{\varphi} \rangle \Rightarrow$ transformaciones de campos reflejan la dualidad
- Tipo I $\mathrm{SO}(32) \xleftrightarrow{S}$ Heterótica $\mathrm{SO}(32)$
- Tipo IIA $\xleftrightarrow{S}$ 11d Teoría M compactificada en círculo

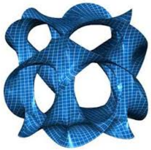
  La teoría M está relacionada con supergravedad 11d
  sus objetos fundamentales son membranas acopladas a C_{MNP}
- Heterótica $\mathrm{E}_8 \times \mathrm{E}_8$ $\xleftrightarrow{S}$ 11d Teoría M compactificada en intervalo

Simetría espejo

teoría de cuerdas IIA en variedad Calabi-Yau Y	$\longleftrightarrow$	teoría de cuerdas IIB en variedad Calabi-Yau espejo $\hat{Y}$

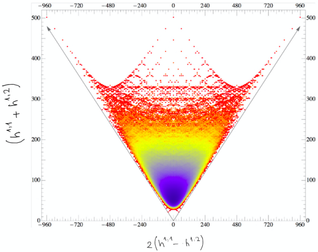


$\longleftrightarrow$



$$Y:\ h^{1,1}, h^{1,2} \quad \longleftrightarrow \quad \hat{Y}:\ \hat{h}^{1,1} = h^{1,2}, \hat{h}^{1,2} = h^{1,1}$$

móduli Kähler $\longleftrightarrow$ móduli estructura compleja



Fenomenología de Cuerdas

Objetivos

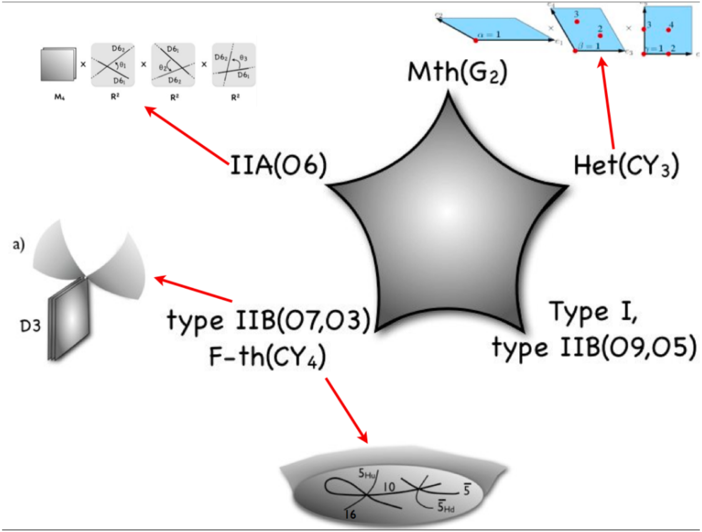
- Estudiar cómo reproducir el Modelo Estándar en teoría de cuerdas/teoría M, y cómo resolver sus incógnitas.
    - Identificar clases de construcciones en las cuales se realizan propiedades características: quiralidad, replicación de familias, estructura de masas, ...
    - Extraer propiedades genéricas y analizar los mecanismos responsables.
    - Obtener y examinar modelos explícitos.

Dos diferencias importantes con construcción convencional de modelos:

∗ Al especificar la configuración, e.g. el espacio interno o el contenido de D-branas, quedan fijados el espectro de partículas y las interacciones

∗ No hay parámetros libres. Los acoplos y las masas dependen de vevs indeterminados de campos escalares (móduli)

Clases de modelos



Heterótica $\mathrm{E}_8 \times \mathrm{E}_8$ en Calabi-Yau

▷ E_8 contiene grupos de teorías de gran unificación

$\mathrm{E}_8 \supset \mathrm{E}_6 \times \mathrm{SU}(3)$
quarks + leptones en rep. **27**

$\mathrm{E}_6 \supset \mathrm{SO}(10) \times \mathrm{U}(1),\ \mathbf{27} = \mathbf{16} + \mathbf{10} + \mathbf{1}, \quad \mathrm{SO}(10) \supset \mathrm{SU}(5) \times \mathrm{U}(1),\ \mathbf{16} = \mathbf{10} + \overline{\mathbf{5}} + \mathbf{1}$

$\mathrm{SU}(5) \supset \mathrm{SU}(3) \times \mathrm{SU}(2) \times \mathrm{U}(1),\ \mathbf{10} = (\mathbf{3},\mathbf{2}) + (\overline{\mathbf{3}},\mathbf{1}) + (\mathbf{1},\mathbf{1}),\ \overline{\mathbf{5}} = (\overline{\mathbf{3}},\mathbf{1}) + (\mathbf{1},\mathbf{2})$

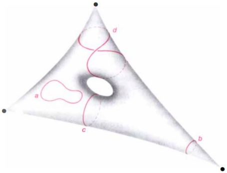
▷ 10d, $\mathcal{N} = 1, \mathrm{E}_8 \times \mathrm{E}_8 \quad \xrightarrow[\langle F_{MN} \rangle \text{ en } \mathrm{SU}(3)]{\mathrm{Mink}_4 \times \mathrm{CY}} \quad$ 4d, $\mathcal{N} = 1, \mathrm{E}_6 \times \mathrm{E}_8$

$\#\,\mathbf{27} = h^{1,1}, \ \#\,\overline{\mathbf{27}} = h^{1,2}$

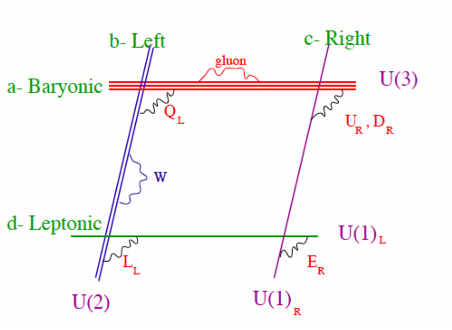
$\#$ generaciones $= |h^{1,1} - h^{1,2}|$

▷ otros $\langle F_{MN} \rangle \longrightarrow$ modelos semirealistas (MSSM + Higgs) con 3 generaciones

▷ posible obtener (MSSM + Higgs) con dimensiones extra en orbifolds (descripción exacta de propagación de cuerdas)



Modelo Estándar vía branas intersecantes



Modelo de Madrid: orientifolio tipo IIA con $\mathrm{D6}$ branas

- ▷ grupo gauge $SU(3) \times SU(2) \times U(1) \times [U(1)^3]$ 3 Z' masivos
- ▷ las branas se intersecan 3 veces $\Rightarrow$ 3 generaciones

Algunas propiedades genéricas

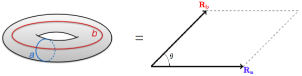
- espectro quiral de fermiones
- replicación de generaciones
- unificación de acoplos, con o sin grupos de gran unificación
- existencia de axiones
- existencia de móduli
- ausencia de simetrías globales

Módulo

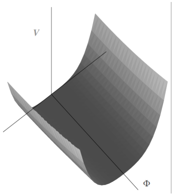
- Móduli: parámetros libres de la compactificación, cambian tamaño y forma del espacio interno pero no su topología. E.g.:

  en compactificación circular: radio R

  en compactificación en T^2: parámetro Kähler T
  parámetro de estructura compleja U



$$U = -i\frac{R_b}{R_a}e^{i\theta}, \quad T = R_aR_b\sin\theta + iB_{ab}$$



- En 4d los móduli corresponden a campos escalares Φ, con potencial plano $\Rightarrow$ masa nula, $\langle\Phi\rangle = 0$

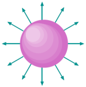
- Problemas: campos móduli de masa nula pueden mediar 'quintas fuerzas', constantes de acoplo dependen de vev $\langle\Phi\rangle$
  Solución: generar un potencial para obtener $\langle\Phi\rangle \neq 0$, posible vía flujos

Flujos

▷ Flujos: valores de fondo no-triviales de tensores de campo YM, NS-NS, R-R. E.g.

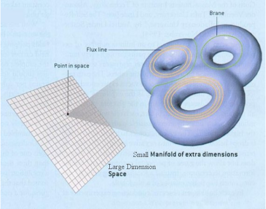
campo Maxwell $A_1, \;\; F_2 = dA_1$

$$\int_{\Pi_2} \langle F_2 \rangle = g \neq 0$$



campo Kalb-Ramond $B_2, \;\; H_3 = dB_2$

$$\int_{\Pi_3} \langle H_3 \rangle = h \neq 0$$



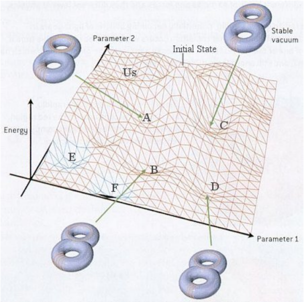
▷ Los flujos permean ciclos no-triviales Π_n en las dimensiones extra

▷ Los flujos generan potenciales V en 4d dependientes de los campos móduli, e.g.

$$S_{10} = M_s^8 \int d^{10}x \, \sqrt{-G} \left\{ e^{-2\varphi} \left[\mathcal{R} - H_{MNP}^2 \right] + \cdots \right\} \;\; \xrightarrow[\langle H_3 \rangle]{\mathcal{M}_4 \times Y} \;\; V \sim \frac{h^2 e^{2\varphi}}{\mathcal{V}^2}$$

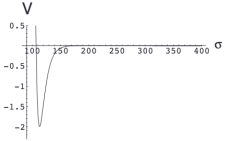
$\mathcal{V}$: volumen del espacio interno Y

El paisaje de las cuerdas

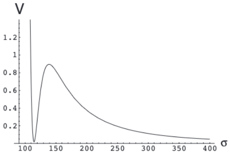


▷ *String Landscape*: conjunto de soluciones de vacío, número inmenso $> 10^{500}$!

▷ En soluciones genéricas el espacio-tiempo es AdS_4, con $\Lambda < 0$, pero existen modelos dS_4, i.e. con constante cosmológica Λ positiva, e.g. KKLT (Kachru, Kallosh, Linde, Trivedi) y LVS (Balasubramanian, Berglund, Conlon, Quevedo)



$\longrightarrow$



▷ Transiciones cuánticas entre estados de vacío (efecto túnel) permiten solución antrópica al problema de la constante cosmológica

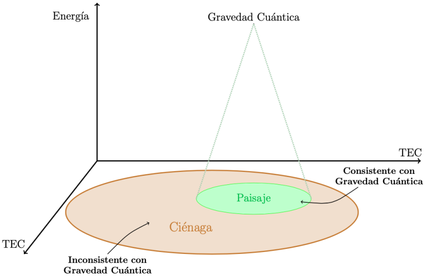
Resumen y Perspectivas

- Las cuerdas proporcionan un formalismo unificado para describir todas las interacciones fundamentales incluyendo gravedad a nivel cuántico
- La formulación es sencilla pero requiere dimensiones extra
- La compactificación de las dimensiones extra conduce a modelos con el contenido de materia y las interactiones del Modelo Estándar, pero no se han hecho predicciones comprobables
- Simetrías típicas de cuerdas tales como T-dualidad y S-dualidad subyacen en la unificación de las teorías de cuerdas y restringen la dinámica.
  Otra dualidad importante es la correspondencia AdS/CFT (Maldacena)
- Mucho por hacer. Profundizar el conocimiento podría permitir hacer predicciones precisas así como descubrir nuevas propiedades físicas y matemáticas

- Desarrollo reciente: Programa de la Ciénaga (*Swampland*, Vafa)

  * intenta establecer propiedades que debe cumplir una teoría efectiva de campos (TEC) para ser consistente con gravedad cuántica, i.e. busca determinar el efecto de gravedad cuántica a energías inferiores a $M_{\rm P}$

  * las propiedades se plantean como conjeturas motivadas por teoría de cuerdas y características de agujeros negros, e.g.



  * Conjetura de ausencia de simetrías globales en toda teoría consistente con gravedad cuántica, i.e. completa en el UV

  * Conjetura WGC: gravedad es la fuerza más débil $\Rightarrow$ en una teoría UV completa con grupo $\mathrm{U}(1)$ debe existir una partícula de masa m y carga q tal que $m \leq q\, M_{\rm P}$

  * Universalidad de cuerdas: toda teoría consistente con gravedad cuántica se puede realizar en teoría de cuerdas

Fin